

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

**USO DE IMAGENS DO SENSOR MODIS NO MONITORAMENTO DO
FLUXO DE SEDIMENTOS NO BRAÇO DO RIO INDAIÁ,
RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS – MG**

Carlos Eduardo Toniazzo Pinto

Orientador: Prof. Dr. Jean Michel Martinez

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

BRASÍLIA
2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

USO DE IMAGENS DO SENSOR MODIS NO MONITORAMENTO DO
FLUXO DE SEDIMENTOS NO BRAÇO DO RIO INDAIÁ,
RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS – MG

Carlos Eduardo Toniazzo Pinto

Orientador: Prof. Dr. Jean Michel Martinez
Co-orientador: Paulo Henrique Bretanha Junker Meneses

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

COMISSÃO JULGADORA

Presidente:

Jean Michel Martinez

(Assinatura)

Examinadores:

Gustavo M. Baptista

(Assinatura)

(Assinatura)

BRASÍLIA
2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por estar sempre presente na minha vida.

Agradeço aos professores da especialização que sempre se mostraram presentes e dispostos para esclarecer todas as dúvidas e dificuldades no decorrer deste ano.

Ao professor Paulo Menezes, pela oportunidade do curso de especialização.

Ao meu professor orientador Jean Michel Martinez pela sua paciência e disposição.

Aos coordenadores do projeto CT-ENERG: “redução de perdas, aumento de eficiência e redução de custos de operação e de manutenção”, Marco Ianirruberto e Henrique Llacer Roig, pela oportunidade de trabalho.

Ao co-orientador e amigo Paulo Henrique Meneses pela sua disponibilidade e sugestões.

Agradeço a Silvana Lima Martins pelas sua amizade e sua ajuda nas fases finais da escrita.

A minha família, em especial a minha querida mamãe Alda, que sempre incentivou na minha vida acadêmica.

Aos amigos e amigas que fiz no decorrer do curso de especialização (Marcelo, Erivan, Marco Aurélio, Felipe, Carlos Maia, Eluzai, Klebão, Samuel, Leonardo, Melina, Omolabake, Mario Celso e Bruno).

RESUMO

Estudos de monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos ainda passam por muitas dificuldades. A dimensão das regiões de estudo, muitas vezes determinada pela extensão das bacias hidrográficas, eleva os custos dos estudos e impossibilita análises espaciais periódicas. As técnicas convencionais de monitoramento das águas não podem acompanhar a crescente demanda de controle da qualidade das águas, sendo necessário criar soluções alternativas. Atendendo a essa necessidade, destacam-se os sensores remotos que permitem levantar dados e monitorar alvos que estão na superfície em um curto espaço de tempo. Assim, este trabalho objetivou monitorar o fluxo de entrada de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias – MG, com base em dados das imagens de satélites. Foi adquirida uma série temporal de 12 anos das imagens MODIS, compostas de 8 dias. As estimativas de reflectância da superfície foram calculadas usando o algoritmo MOD3R. Os resultados apontaram uma forte relação entre os dados de reflectância e a descarga sólida calculada no rio Indaiá. Há também uma forte variação da reflectância ao longo do braço do reservatório no sentido da montante à jusante, com altos valores de reflectância à montante e valores baixos à jusante. Este trabalho concluiu que o percentual de registros válidos estimados nas imagens MODIS atendeu aos requisitos de monitoramento do fluxo de sedimentos. As estimativas de reflectância da água mostraram grande potencial em relacionar as respostas espectrais das imagens de satélites com a variação da descarga sólida de sedimento no braço do rio Indaiá.

Palavras-chave: Fluxo de sedimentos, sensoriamento remoto, MODIS, Reservatório de Três Marias - MG.

ABSTRACT

Monitoring and management studies of water resources still go through many difficulties. The size of the areas of study, often determined by the extent of watersheds, raises the costs of studies and complicates the periodic spatial analysis. Conventional techniques for monitoring water can not keep up with the growing demand for control of water quality, thus it is necessary to create alternatives. Given this need, we highlight the remote sensors that allow collecting data and monitoring targets that are on the surface in a short time. This study aimed to monitor the inflow of sediment in a stretch of the Indaiá river, in the Tres Marias reservoir – MG – Brazil, based on data from satellite images. It was obtained a 12-year time series of MODIS images, composed of 8 days. Estimates of surface reflectance were calculated using the algorithm MOD3R. The results showed a strong relationship between the reflectance data and the solid discharge calculated in the Indaiá river. There is also a strong variation of reflectance along the stretch of river, from the upstream to downstream, with high reflectance values upstream, and low reflectance values downstream. This study concluded that the estimated percentage of valid records in MODIS images met the requirements for monitoring the flow of sediment. Estimates of water reflectance showed great potential in relating the spectral responses of the satellite images with the variation of solid discharge of sediment in the Indaiá river stretch.

Keywords: sediment flow, remote sensing, MODIS, Tres Marias Reservoir - MG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Visão geral do reservatório de Três Marias e sua bacia de contribuição.....	12
Figura 2. Imagens MODIS (produto de reflectância da superfície) dos satélites Terra e Aqua. (A) - Resolução espacial de 250 metros / (B) - Resolução espacial de 500 metros.....	18
Figura 3. Máscaras criadas para análise da reflectância da água no braço do rio Indaiá no reservatório Três Marias.....	19
Figura 4. Fluxo de vazão sólida diária na estação do rio Indaiá. Fonte CEMIG.....	23
Figura 5. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.....	25
Figura 6. Estimativas de reflectância da superfície da água nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.....	27
Figura 7. Médias mensais de reflectância da superfície das máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.....	28
Figura 8. Dados médios mensais de reflectância em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.....	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
2.1. Geral.....	10
2.2. Específicos	10
3. ÁREA DE ESTUDO	11
3.1. Histórico.....	11
3.2. Caracterização da área de estudo	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1. Hidrossedimentologia	17
5.2. Imagens MODIS	17
5.3. Análise das imagens de satélite	18
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6.1. Hidrossedimentologia	23
6.2. Análise das estimativas de reflectância nas imagens MODIS	23
6.3. Avaliação espaço-temporal dos dados de reflectância MODIS.....	25
6.4. Análise espaço-temporal da deposição dos sedimentos no reservatório	28
7. CONCLUSÃO.....	30
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos comportamentos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica é fundamental para a adequada gestão dos seus recursos hídricos, bem como para o suporte das decisões relativas ao desenvolvimento de atividades antrópicas e o acompanhamento de eventuais impactos, tais como os processos de assoreamento, poluição e eutrofização.

Estudos de monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos ainda passam por muitas dificuldades, tanto em termos de análises quantitativas quanto qualitativas. A falta de dados é um dos principais problemas devido ao alto custo dos levantamentos de campo. A eficácia do monitoramento hidrológico é dado em função do número de parâmetros, da frequência e da distribuição espacial das medições na bacia (HOPPER, 1997). A dimensão das regiões de estudo, muitas vezes determinada pela extensão das bacias hidrográficas, eleva os custos dos estudos e impossibilita análises espaciais periódicas.

Estima-se que três quartos do planeta, não permitem um monitoramento em plena escala da qualidade d'água e não será obtido em um futuro próximo (GEMS, 2003). As técnicas convencionais de monitoramento das águas não podem acompanhar a crescente demanda de controle da qualidade das águas, sendo necessário criar soluções alternativas.

Para o monitoramento da qualidade da água é fundamental uma observação contínua da área, com frequência definida pela variabilidade do fenômeno e pelo comportamento e dinâmica do curso de água. Alguns aspectos devem ser considerados para avaliação e monitoramento dos recursos hídricos, tais como: ciclo de observação, técnicas a serem utilizadas, algoritmos específicos, resolução temporal do sensor, parâmetro a ser investigado, entre outros.

O monitoramento da qualidade das águas pode ser realizado em estações que, por sua vez, precisam ser monitoradas com um intervalo de tempo regular o suficiente para medir as variações em concentrações dos elementos geoquímicos e dos sedimentos depositados ao longo do ciclo hidrológico e, particularmente, entre os períodos de vazão baixa e alta (MARTINEZ *et al.*, submetido). As concentrações multiplicadas pela vazão do rio permitem calcular os fluxos dos elementos. Esses dados de fluxos podem ser usados para computar o aumento ou o decréscimo da presença dos elementos entre as estações, ou para acessar as taxas de exportação de material para um estuário ou uma represa.

A possibilidade de determinar as fontes, os modos de transporte e a taxa de exportação dos elementos numa bacia hidrográfica constituem a base de um diagnóstico para a elaboração de planos de gestão e de preservação ambiental.

Para monitorar os fluxos sedimentares de um determinado ponto do rio ou reservatório é necessário dispor de técnicas e ferramentas que possibilitem a coleta de informações de forma repetitiva e em um curto espaço de tempo. Atendendo a essa necessidade, destacam-se os sensores remotos que permitem levantar dados e monitorar alvos que estão na superfície. A utilização de dados de sensoriamento remoto torna-se indispensável em estudos hidrológicos, como no acompanhamento de cheias em planícies, mapeamento de eventos de cheias e vazante, bem como o estudo de sedimentos transportados pelos cursos de água.

Os produtos de sensoriamento remoto em nível orbital vêm sendo amplamente utilizados pela comunidade científica. Os satélites adquirem dados da superfície da terra de maneira contínua, as imagens por eles captadas constituem importante ferramenta para avaliação do comportamento hidrológico ao longo do tempo, podendo obter séries temporais de imagens e acompanhar seu ciclo hidrológico.

Estudos realizados por Carvalho (2001) e Macedo (2009) nas bacias de contribuição do reservatório de Três Marias na região do alto São Francisco, revelam elevados índices de carga de sedimentos. Dentre estas, a bacia do rio Indaiá é a que apresenta um alto grau de degradação, sendo um dos rios que contribui com uma grande carga de sedimentos para o reservatório. Devido a essa problemática da bacia do rio Indaiá, este estudo foi focado no trecho que corresponde ao encontro do rio com o reservatório, denominado braço do rio Indaiá.

Este trabalho encontra-se inserido na linha de pesquisa e estudos sobre monitoramento de reservatórios do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília - UnB. Coloca-se no âmbito do objetivo específico da chamada pública CT-ENERG: “redução de perdas, aumento de eficiência e redução de custos de operação e de manutenção”. O projeto geral tem como objetivo estabelecer uma metodologia que permita a análise espaço-temporal dos processos erosivos, transporte e deposição dos sedimentos que atingem os reservatórios, mediante integração de ferramentas geofísicas, geoquímicas e de sensoriamento remoto.

Assim, este trabalho foi focado em monitorar o fluxo de entrada de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias – MG, com base em dados das imagens de satélites.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

- Monitorar o fluxo de entrada de sedimentos no braço do rio Indaiá, no reservatório Três Marias – MG, a partir imagens de satélite.

2.2. Específicos

- Avaliar a resposta espectral das séries temporais de 12 anos de imagens do sensor MODIS;
- Caracterizar a distribuição espaço-temporal de concentração de sedimentos a partir de séries temporais de refletância no braço do rio Indaiá;
- Detectar tendências nas séries temporais de fluxo de sedimentos geradas a partir de dados dos satélites.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Histórico

As Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. (CEMIG) criada em 22 de maio de 1952, teve como principal objetivo realizar um plano global de eletrificação para o Estado de Minas Gerais que atendesse ao parque industrial mineiro em fase de expansão, substituindo as usinas isoladas existentes por um sistema integrado eficiente que atendesse a demanda de energia das cidades de entorno. Entre 1957 e 1961, por conta de um contrato firmado com a Comissão do Vale do São Francisco - CVSF, a CEMIG construiu a usina de Três Marias, visando a produção de energia elétrica, o amortecimento de enchentes e a melhoria da navegabilidade do rio São Francisco.

A UHE Três Marias iniciou sua operação em 1962, e faz parte do Sistema Interligado Nacional. Tem uma capacidade de geração de 396,00 MW, com um reservatório de 15.280 m³ de volume útil, e fornece energia a importantes cidades mineiras, dentre elas, a capital Belo Horizonte. A bacia de contribuição da usina apresenta uma área de drenagem de cerca de 50.000 km², tendo como principais tributários os rios Abaeté, Borrachudo, Indaiá, Pará e Paraopeba (ONS, 2012).

3.2. Caracterização da área de estudo

O reservatório de Três Marias localiza-se na região do alto São Francisco, entre os paralelos 18° e 21° latitude sul e os meridianos 43°30' e 46°40' oeste da longitude do estado de Minas Gerais. A área drenada estende-se desde as cabeceiras na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora (MG), abrangendo as sub-bacias dos rios das Velhas, Pará e Indaiá, além das sub-bacias dos rios Abaeté e Jequitibá.

São encontradas na região duas tipologias climáticas, de acordo com a classificação de Köppen:

Cwa - clima temperado brando com verão quente (temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C); a estação seca coincide com o inverno.

Aw - clima tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é sempre superior a 18 °C.

A região apresenta altas taxas pluviométricas, com valores que podem variar entre 1.150 e 1.450 mm anuais. O regime pluviométrico é típico das regiões de clima tropical, com a ocorrência dos valores mensais máximos no período do verão e dos mínimos no inverno. Os

meses de novembro, dezembro e janeiro correspondem aos meses mais chuvosos com cerca de 55 a 60% do total anual precipitado. Em junho, julho e agosto são os meses mais secos com menos de 5% de precipitação anual (MACEDO, 2009).

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL divide a bacia do rio São Francisco em nove sub-bacias. A região corresponde à sub-bacia 40. Esta sub-bacia representa a área de drenagem do reservatório de Três Marias e parte da área de drenagem do alto São Francisco (sub-bacias 40 e 41).

Os principais afluentes que contribuem diretamente para o reservatório são: na margem esquerda, os rios Borrachudo e Indaiá. E na margem direita, os rios Pará, Paraopeba e São Francisco (curso principal).

Esse estudo foi focado no encontro do rio Indaiá com o reservatório, denominado braço do rio Indaiá (Figura 1). O Rio Indaiá nasce na cota altimétrica de 1.170m, próximo à comunidade de Cachoeirinha no município de Córrego Danta-MG. Em seu percurso de 226 km, sua bacia hidrográfica é da ordem de 3.340 km², cruza a BR-262, indo desaguar no reservatório de Três Marias (OLIVEIRA, 2007).

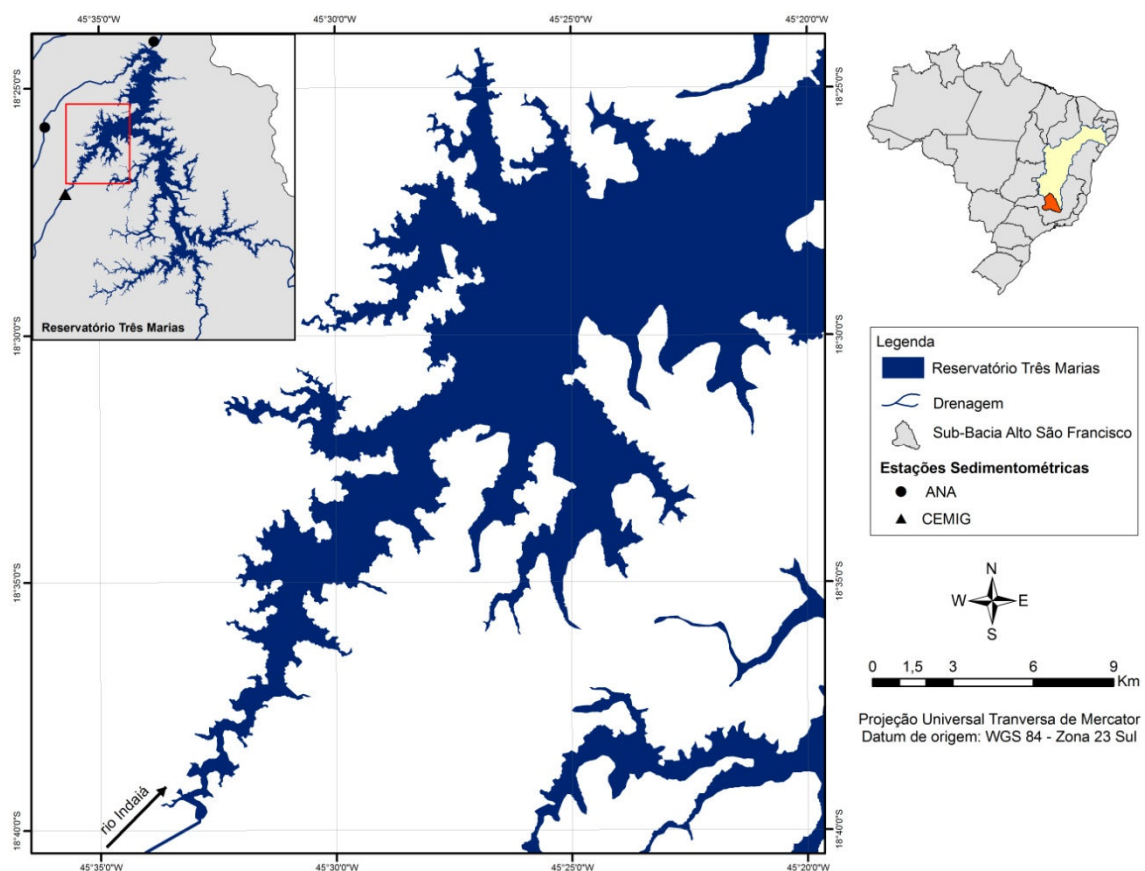


Figura 1. Braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O transporte de sedimentos é um fenômeno natural e faz parte da evolução da paisagem, originando várias formas geomorfológicas, pois desde seus primórdios, a Terra tem sido modelada, entre outros fatores, pelos processos de erosão natural e deposição de sedimentos (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Os processos de produção e deposição de sedimentos ao longo de uma bacia têm seus efeitos potencializados pela influência do homem, por meio de desmatamentos, construções, mineração e atividades agrícolas desordenadas (SIVIERO e COIADO, 1999).

A produção de sedimento refere-se à quantidade de sedimento que uma bacia exporta em um determinado período de tempo. Ela pode ser expressa em termos absolutos (t/ano) ou em termos específicos, ou seja, sua relação com a área drenada (t/km² ano). Esta última é denominada de produção de sedimento específica ou taxa de produção de sedimento. A produção de sedimento pode ser calculada para toda a bacia hidrográfica, para a área de influência de um reservatório ou de uma seção transversal do rio, como por exemplo, uma estação sedimentométrica (MORRIS e FAN, 1997).

Normalmente, a produção de sedimento é calculada a partir de programas de monitoramento da descarga sólida (SHEN e JULIEN, 1992; CARVALHO, 1994), ou por meio da medição do volume de sedimentos acumulado em reservatórios e lagos (CHEPAR, 1999).

Os sedimentos exercem grande influência nos parâmetros de qualidade das águas, pois, ao serem transportados para os cursos de água, carregam consigo outros elementos que, dependendo da situação do rio, podem ser benéficos ou maléficos ao meio ambiente e aos seus usuários (CARVALHO *et al.*, 2000).

As propriedades da qualidade da água são monitoradas por estudos *in situ* e algumas propriedades, tais como matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão e clorofila podem ser estudadas por sensoriamento remoto. Segundo Valério (2009), a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto pode auxiliar na superação da limitação espaço-temporal dos métodos tradicionais *in situ*, pois adquire informações necessárias em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo a análise estrutural dos ecossistemas aquáticos.

É nesse contexto que a tecnologia de sensoriamento remoto se insere como fonte de informação a ser integrada às convencionais. Embora a tecnologia de sensoriamento remoto esteja disponível e seja amplamente utilizada em vários campos do conhecimento, como é o caso da gestão da produção agrícola, previsão meteorológica, sistemas de alerta de fogo e de

desflorestamento, seu uso pela comunidade gestora de recursos hídricos é ainda insipiente (NOVO, 2007).

Os corpos de água representam uma mistura complexa de diversos materiais dissolvidos e particulados que possuem propriedades ópticas características. Esses materiais interagem com a luz solar de forma diferenciada devido as suas concentrações e naturezas, modificando a cor da água, pois eles absorvem e/ou espalham seletivamente a luz incidente. As partículas orgânicas e inorgânicas presentes na água têm propriedades específicas de absorção que modificam a cor da água, tornando-a mais esverdeada, amarelada ou avermelhada (KAMPEL e NOVO, 2005).

Os primeiros estudos realizados no mundo (MERTES *et al.*, 1993) e no Brasil (NOVO *et al.*, 1989), demonstraram a possibilidade de relacionar, por satélite, a cor das águas ao seu conteúdo em sedimentos. Verificou-se nesses estudos que as propriedades ópticas das águas são fortemente influenciadas pelo conteúdo e tipo de sedimento.

No Brasil, trabalhos utilizando esta técnica aplicada a corpos de água continentais, têm sido desenvolvidos demonstrando grande potencial para mapear a composição das águas (NOBREGA, 2002; RUDORFF, 2006; BARBOSA, 2007). Contudo, esses trabalhos não foram sistematizados em redes de monitoramento hidrológicos. Isso deve-se à falta de sensores espaciais adequados, os quais permitiriam um monitoramento preciso em termos de resolução temporal (número de imagens disponíveis por unidade de tempo) e/ou espacial (tamanho dos rios que poderiam ser estudados) para propiciar uma relevante rede de monitoramento.

Na última década tornou-se cada vez mais comum a utilização de imagens de satélite que apresentam resolução moderada nos estudos hidrológicos. O aumento da utilização de imagens orbitais é consequência, principalmente do baixo custo de seus produtos, bem como a qualidade das suas informações.

O sensor MODIS, principal instrumento a bordo das plataformas Terra e Aqua, foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do VIS e do IV do espectro eletromagnético, com resolução temporal diária. O instrumento MODIS possui uma resolução radiométrica de 12 bits, em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km (RUDORFF *et al.*, 2007).

Como nos demais instrumentos a bordo do satélite Terra e Aqua, os dados MODIS são transferidos para estações terrestres em *White Sands*, Novo México, através de um sistema

denominado *Tracking and Data Relay Satellite System* (TDRSS). Estes são então enviados para os dados de pesquisa EOS e os sistemas de operações (EDOS) no *Goddard Space Flight Center*. Neste centro começam os processamentos dos dados propriamente dito. São divididos em cinco níveis (0 a 4), que irão variar em função do grau de processamento realizado. Vale ressaltar que, após o processamento do nível zero pelo sistema operacional, o centro de arquivos denominado *Goddard Space Flight Center Earth Sciences Distributed Active Archive Center* (GES DAAC) irá produzir os níveis 1A e 1B e os produtos de geolocalização. Os produtos de níveis mais elevados são, inicialmente, produzidos pelo Sistema de Processamento Adaptativo do sensor MODIS (*MODIS Adaptive Processing System - MODAPS*), e então distribuídos entre três outros centros de DAACs (JUSTICE *et al.*, 2002a). Resumindo, todos os produtos MODIS são gerados, segundo Justice *et al.* (2002b) em um determinado nível hierárquico, que são:

Nível 0 – este nível retrata a imagem em seu estado bruto, sem tratamento de espécie alguma. Não é disponível ao usuário, não constando, portanto, das listas de produtos padrões do sensor MODIS.

Nível 1 (1A): contém uma base de dados de 36 canais do MODIS, utilizado como dado de entrada para geolocalização, calibração e processamento. Indicadores de qualidade são adicionados aos dados para indicar a perda ou *pixels* ruins. Medidas no visível, infravermelho próximo e médio são feitas apenas durante o dia, enquanto que as medidas na faixa do infravermelho termal são feitas tanto de dia, quanto de noite.

Nível 1 (1B): os produtos contém os dados de calibração e geolocalização para as 36 bandas geradas pelo nível 1 A. As radiâncias são em $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$. Em adição, o BRDF (reflectância bidirecional) pode ser determinado para bandas reflectivas solares (1-19, 26) através do conhecimento da irradiação solar (por exemplo, determinação de dados MODIS e a geometria de iluminação do alvo). Dados adicionais são fornecidos, incluindo as estimativas de qualidade, de erro e dados de calibração.

Nível 2: os produtos deste nível são derivados de radiâncias calibradas de prévios produtos MODIS. Os produtos conhecidos como nível 2G (L2G) são gerados a partir de um conjunto de dados de um simples dia do nível 2, reorganizados e armazenados em uma grade baseada na Terra (*earth-based grid*), preservando todas as amostras dos dados originais do nível 2. Cabe salientar que, a menor quantidade de dados processados em um determinado período é definida nos níveis 1 e 2 como granular (*granule*) e correspondem à aproximadamente 5 min. de imageamento. O MODIS imagea 288 “grânulos” a cada 24 h,

sendo sua cobertura equivalente a uma área aproximada de 2340 Km (*acrosstrack*) por 2030 Km (*along-track*).

Nível 3: neste nível os produtos são espacialmente reamostrados e temporariamente compostos para produzir uma simples estimativa das variáveis geofísicas para cada grade de localização. As escalas de tempo dos produtos destes níveis variam de um simples dia para um ano inteiro.

Nível 4: os produtos deste nível são gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para se estimar as variáveis geofísicas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Hidrossedimentologia

A CEMIG opera estações fluviossedimentométricas com o objetivo de monitorar o aporte de sedimentos nos reservatórios, visando quantificar e caracterizar os sedimentos trazidos pelos rios em alguns locais de interesse.

Este monitoramento conta atualmente com estações localizadas em diferentes bacias hidrográficas que operam em regime detalhado de coleta de amostras e medições de descargas sólidas. Para a medição do transporte de sedimentos nas estações de monitoramento, a CEMIG utiliza técnicas de amostragem que permitem, a partir de sua análise, o cálculo do volume transportado. Para isso, são feitas coletas ao longo do ano, de forma mais concentrada na estação chuvosa, uma vez que os maiores volumes de sedimentos são transportados pelas maiores vazões.

As amostras coletadas são encaminhadas ao Laboratório Sedimentológico da CEMIG em Belo Horizonte. Os estudos realizados caracterizam o sedimento quanto à granulometria e concentração. As informações obtidas subsidiam estudos hidrossedimentológicos que avaliam a vida útil dos reservatórios, os impactos nas comunidades ribeirinhas e nas vidas aquáticas, os locais com maior deposição de sedimentos, além de orientar as ações dos Comitês de Bacias Hidrográficas quanto à degradação da bacia.

Para compreensão da variabilidade do ciclo hidrossedimentológico, foram utilizados nesse estudo dados de descarga sólida (sedimentos em suspensão e vazão total) de junho de 1999 a dezembro de 2002 da estação de monitoramento do rio Indaiá, localizada a 10 km do encontro do rio com o reservatório, próximo a cidade Biquinhas-MG.

5.2. Imagens MODIS

Neste estudo foram adquiridas imagens do sensor MODIS, produtos de reflectância da superfície MOD09 e MYD09 (a bordo dos satélites TERRA e AQUA), que são fornecidos previamente calibrados, georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos. No trabalho, são utilizadas imagens de dois tipos A1 e Q1, com resolução espacial de 500 e 250 metros, respectivamente.

As imagens de 500 metros (A1) possuem sete bandas cobrindo a região do visível até o infravermelho médio; já as imagens de 250 metros (Q1) possuem duas bandas radiométricas cobrindo a região do vermelho e infravermelho. O sensor MODIS oferece cobertura em tempo de aquisição diária sobre as áreas tropicais.

As imagens utilizadas são de composições de 8 dias, pois: i) isto reduz a quantidade de imagens com nuvens e, consequentemente, a quantidade de dados a serem analisados; e ii) reduz significativamente o efeito da direção da refletância BRDF e da atmosfera. Os produtos de refletância foram adquiridos a partir da base de dados específica GETMODIS (projeto HYBAM) de fevereiro de 2000 até junho de 2012 representando um total de 1024 imagens. A Figura 2 mostra as imagens selecionadas da área de estudo. A região escura no centro da imagem é referente ao reservatório, as regiões avermelhadas representam a vegetação (cerrado, mata ciliar e reflorestamento) e as regiões claras é solo exposto.

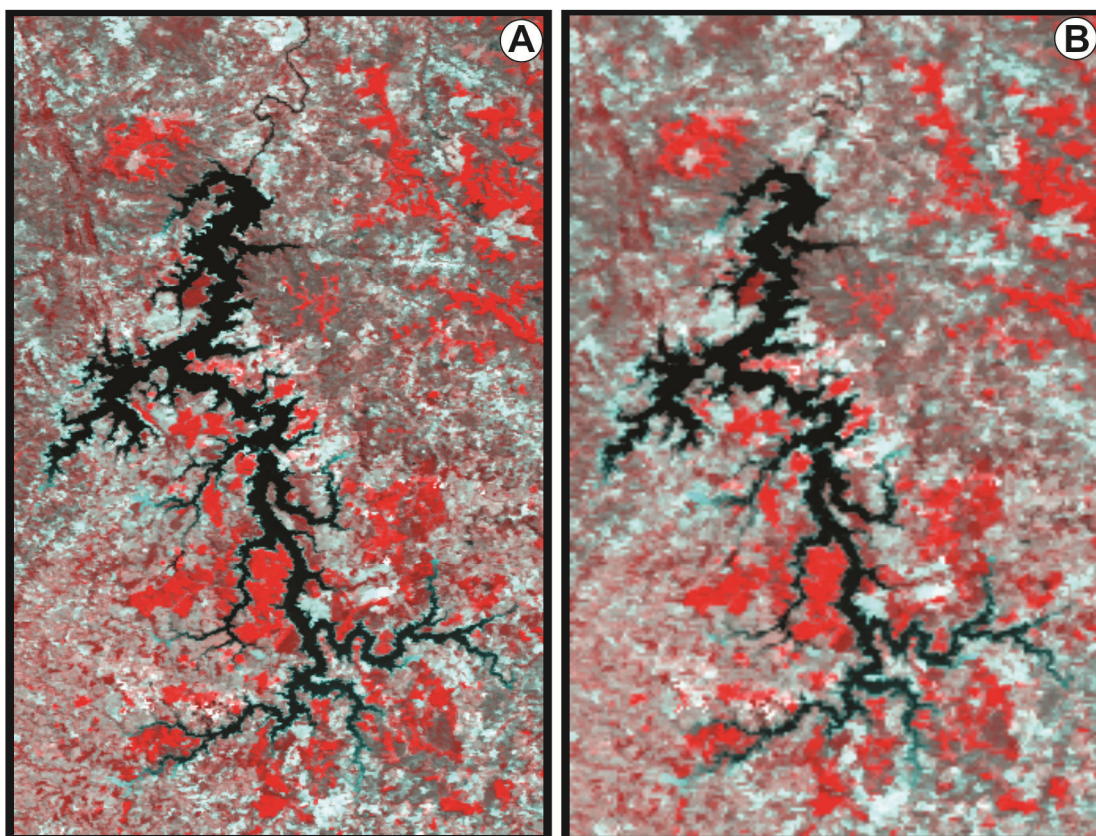


Figura 2. Imagens MODIS (produto de refletância da superfície) do satélite Terra. (A) - Resolução espacial de 250 metros / (B) - Resolução espacial de 500 metros.

5.3. Análise das imagens de satélite

A análise para obtenção da refletância da água no braço do reservatório é dificultada devido à resolução espacial do sensor MODIS. Alguns trechos são estreitos e podem resultar em pixels misturados de água pura ou não. A mistura espectral tem sido amplamente descrita na literatura e ocorre quando diferentes materiais estão presentes em um mesmo pixel. Neste contexto, a mistura espectral na água pode ocorrer com alvos de vegetação ciliar ou bancos de areia, em função da resolução efetiva do sensor (que muda em função do ângulo de visada) e da hidrologia (nível do reservatório).

Para obter estimativas de fluxo de sedimentos ao longo do braço do Indaiá, foram criadas máscaras nas áreas de interesse. Como não existe uma metodologia específica para essas análises, foram primeiramente determinadas regiões que recobriam todo braço; porém, os resultados dos testes apresentaram muitas variações, sendo necessário subdividir e estimar regiões menores e homogêneas. A Figura 3 mostra as máscaras criadas.

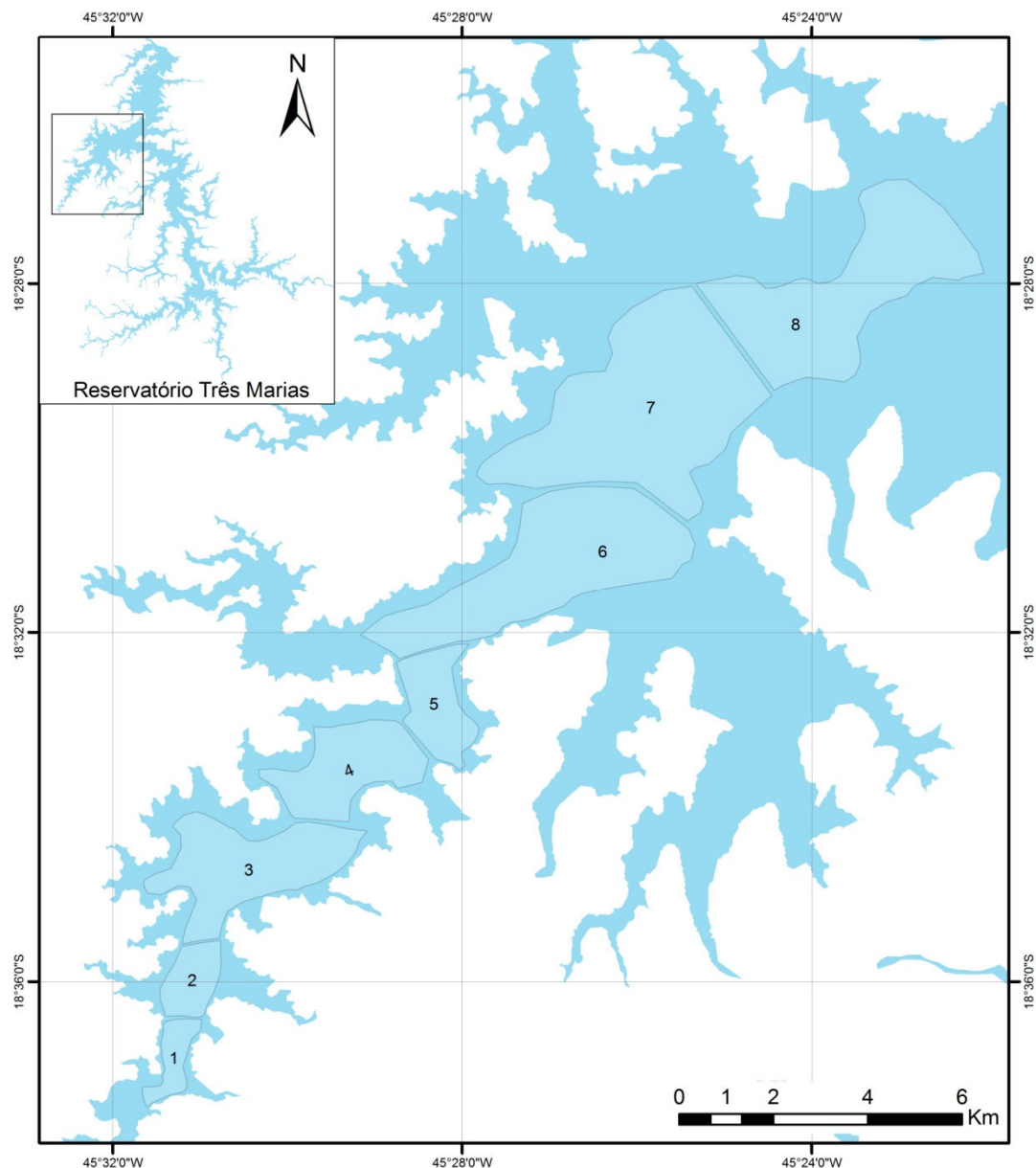


Figura 3. Máscaras criadas para análise da reflectância da água no braço do rio Indaiá no reservatório Três Marias.

Para o cálculo da reflectância da água dos braços do reservatório em uma grande quantidade de imagens é necessária a automatização do processo. Para isso, foi utilizado o algoritmo “*MODIS River Reflectance Retrieval*” (MOD3R), desenvolvido pelo *Institut de*

recherche pour le développement (IRD) (Martinez *et al.* submetido). A metodologia para a extração da reflectância do *endmember* da água usando o MOD3R é apresentada a seguir:

- Os dados de entrada são: a série de imagens da área de interesse e a máscara da região que será estimada;
- O primeiro passo é a extração dos pixels da máscara, excluindo os pixels de qualidade ruim (coberto por nuvens) usando as informações fornecidas nas imagens de 500 metros;
- Os valores de reflectância dos pixels são estimados e classificados em grupos homogêneos (*clusters*), através da metodologia estatística de *K-means*;
- O programa estima o *endmember* de vegetação de maneira automatizada (*cluster* com maior diferença positiva entre o canal do vermelho e Infravermelho);
- Cada *cluster* é testado como o potencial *endmember* de água, e o grupo que produz o menor erro residual é selecionado, solucionando o modelo linear de mistura espectral.

Esse procedimento é centrado na determinação automática do *endmember* de água por testes sucessivos de um grupo de pixels em cada modelo linear de mistura, para encontrar o grupo que melhor descreve outros grupos de pixels misturados na água do rio.

A classificação dos pixels em grupos é baseada no algoritmo estatístico *K-means*. O algoritmo *K-means* é um método de classificação não supervisionado. Basicamente, esse algoritmo busca formar grupos, que são representados por K valores, cada um desses é o valor médio dos objetos que pertencem a esse grupo. Inicialmente é selecionado o número de grupos para a classificação, que consiste nos seguintes passos:

1. Primeiro são estimados os valores de K_1 dos primeiros grupos; estes valores K_1 são as médias dos primeiros grupos que foram classificados;
2. Calcula-se as distâncias dos objetos para cada um dos centróides dos grupos. Os objetos são atribuídos ao grupos cuja distância é mínima em relação a todos os centróides;
3. Os centróides são atualizados conforme o valor médio de todos os objetos atribuídos a esse grupo;
4. Repetem-se os passo 2 e 3 até a satisfação de um determinado critério de convergência;
5. No final do processo temos K grupos G_i com $1 \leq i \leq K$.

Uma vez definidos os grupos, é selecionado aquele que represente melhor o *endmember* de água $Ref_{\text{água}}$. Como não conhecemos esse *endmember*, *a priori*, temos que

testar cada grupo G_i para entender qual é o que melhor descreve o processo de mistura espectral em todos os outros grupos G_j .

Para seleccionar o grupo adequado, procede-se de acordo com a seguinte equação para cada banda radiométrica e para cada grupo resultado da segmentação i com $1 \leq i \leq K$ (Equação 1):

$$Ref_{j,\lambda} = \alpha_j * Ref_{\lambda, \text{água}} + \beta_j * Ref_{\lambda, \text{vegetação}} + \varepsilon_j \quad (1)$$

Onde:

α_j : é a fração do *endmember* d'água no grupo j ;

β_j : é a fração do *endmember* de vegetação no grupo j ;

$Ref_{\lambda \text{ vegetação}}$: é a reflectância do *endmember* de vegetação na banda λ ;

$Ref_{\lambda \text{ água}}$: é a reflectância do *endmember* de Água na banda λ a ser testada nos grupos segmentados : $Ref_{\lambda \text{ água}} \{ G1, G2, \dots, G_j, \dots, GK \}$;

$Ref_{j,\lambda}$: é reflectância do grupo j na banda λ ; e

$\varepsilon_{j,\lambda}$: é o erro residual resultante da resolução da equação (1) para a banda λ e o grupo j .

Na equação 1, o algoritmo assume que o grupo com maior diferença entre infravermelho e vermelho é o *endmember* de vegetação $E_{\text{vegetação}}$. Cada grupo “ i ” resultado da segmentação é testado como um candidato a *endmember* d'água $E_{\text{água}}$. Assim a equação 1 apresenta só duas incógnitas, as frações α_i e β_i para cada grupo “ j ”. Com duas equações (para a banda vermelha e banda infravermelha) para cada grupo G_j , resolvemos o sistema de equações produzindo estimativas de α_i , β_i e ε_i . Acrescentamos uma condição de positividade das frações (algoritmo NNLS) para forçar o algoritmo a produzir estimativas realísticas de frações. Este processo é repetido para cada grupo G_j para guardar no final o resíduo total $\varepsilon_t = \sum_j \sum_b \varepsilon_{j,b}$, que está associado ao candidato a *endmember* de água G_i . De maneira iterativa, vamos testar cada grupo como candidato a *endmember* d'água G_i e o grupo que produzir o menor valor de ε_t será seleccionado como o *endmember* final de água.

Os valores de estimativas da reflectância na água são classificados por alguns critérios de qualidades, como ângulo de incidência solar, ângulo de visada do satélite, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens (banda de qualidade A1 MODIS). Para cada máscara criada, uma tabela em Excel é registrada com valores de reflectância nas bandas do vermelho e infravermelho. Em seguida, os valores das imagens de ambos os satélites (Terra e

Aqua) foram fusionadas selecionando as de melhor qualidade, com fim de obter uma série temporal completa.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Hidrossedimentologia

Após a análise da consistência dos dados, foi traçado um gráfico que relaciona valores de descarga sólida da estação de monitoramento operada pela CEMIG no rio Indaiá, (Figura 4). Os dados de descarga sólida apresentam uma variação definida, com altos valores de descarga nos meses de novembro, dezembro e janeiro, com máximas de 321.000 (t/dia), e mínimas de 4,28 (t/dia) nos meses de junho, julho e agosto.

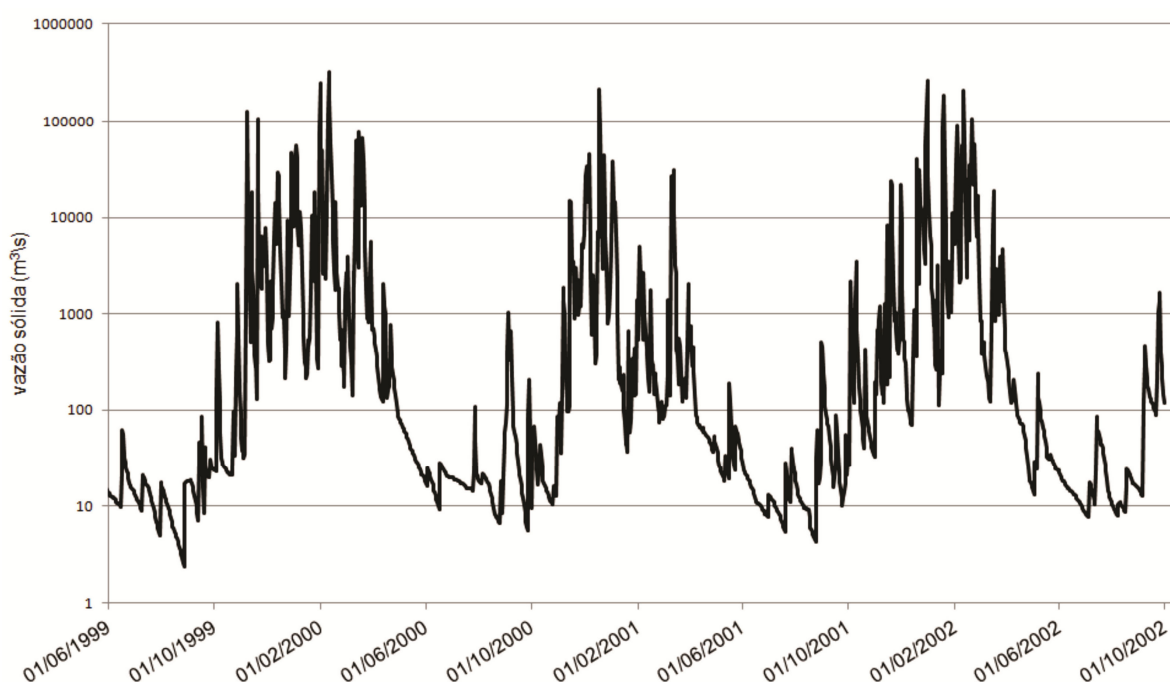


Figura 4. Fluxo de vazão sólida diária na estação do rio Indaiá. Fonte CEMIG.

Segundo Braga *et al.* (2012), o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico em uma bacia hidrográfica é fundamental para o planejamento e desenvolvimento sustentável. Como é o caso do reservatório de Três Marias, a aplicação desse conhecimento viabiliza o planejamento e a geração de eletricidade através de hidrelétricas, uma vez que a vida útil das usinas é determinada com base na retenção e na distribuição dos sólidos em seu reservatório.

6.2. Análise das estimativas de reflectância nas imagens MODIS

A série temporal de 12 anos das imagens MODIS, compostas de 8 dias e processadas com o algoritmo MOD3R (MARTINEZ *et al.*, submetido), foram classificadas e selecionadas

por critérios de qualidades, como ângulo da incidência solar, ângulo de visada do sensor, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens (banda de qualidade MODIS A1), mas nem todas as imagens foram aproveitadas para estimar *endmember* de água. Das 1024 imagens (Terra e Aqua), 82% obtiveram qualidade aceitável e foram usadas para obter estimativas de reflectância da água. Os 18% restantes das imagens não foram aproveitadas, e isso pode estar relacionado à resolução efetiva do sensor (que muda em função do ângulo de visada), cobertura de nuvens (período chuvoso), largura do braço (poucos pixels puros amostrados) e da hidrologia (variação do nível do reservatório).

A Figura 5 mostra as análises diárias da descarga sólida de sedimentos em função das estimativas de reflectância da água nas bandas do vermelho e infravermelho das imagens do MODIS.

As médias das estimativas dos *endmember* de água acompanham a variabilidade do ciclo sazonal de fluxo de sedimentos nas 2 bandas espectrais das imagens. Os resultados das estimativas de reflectância da água mostra grande potencial em relacionar as respostas espectrais das imagens de satélites com a variação da descarga sólida de sedimento no braço do rio Indaiá.

No entanto, a comparação dos dados de campo com as estimativas do MODIS precisa ser moderada. Os dados de campo são amostrados diariamente no mesmo ponto, em uma estação que fica a 10 km do encontro do rio com o reservatório, enquanto que a reflectância do MODIS é avaliada por médias em centenas de pixels com resolução espacial de 250 metros.

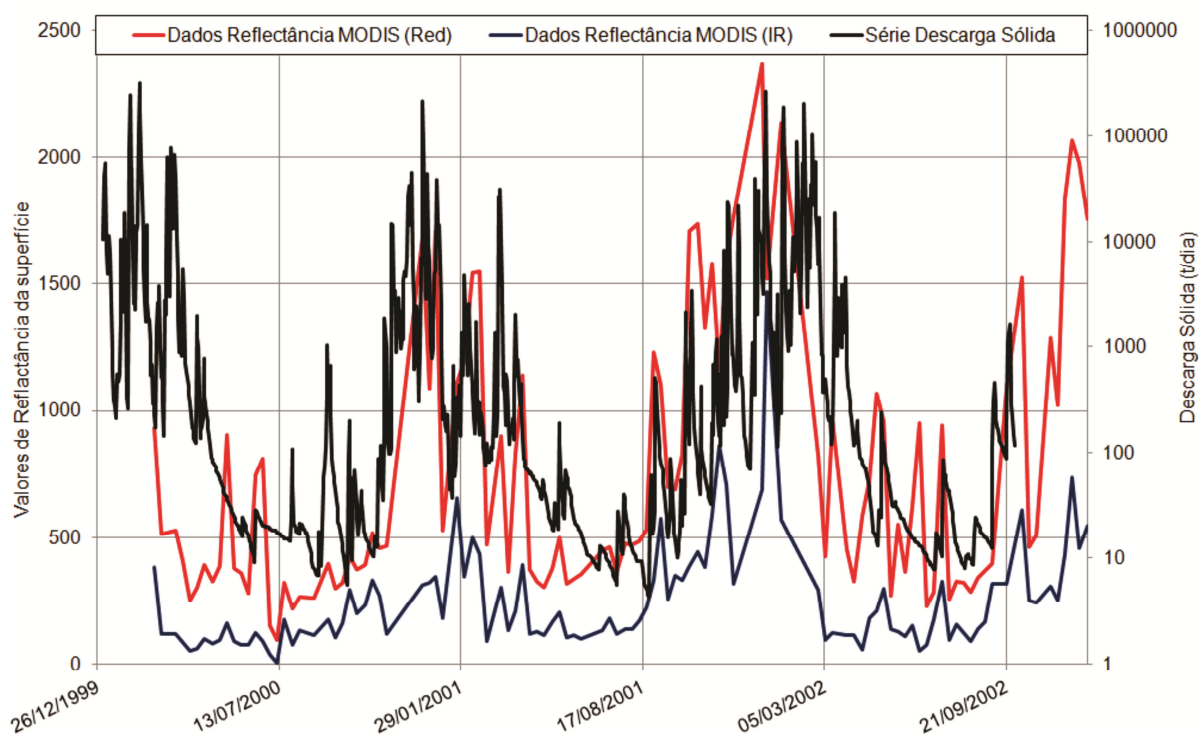


Figura 5. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.

6.3. Avaliação espaço-temporal dos dados de reflectância MODIS

A possibilidade de relacionar a concentração de sedimentos usando as respostas espectrais das imagens de sensoriamento remoto foi investigada por Novo *et al.*, (1989); Doxaran, (2002); e Martinez *et al.*, (2009). Esses trabalhos relatam uma forte correlação entre sedimentos em suspensão e a resposta espectral das imagens, mas essa relação depende do comprimento de onda. A maioria dos estudos concorda que a melhor correlação entre sedimentos em suspensão e reflectância está centrada entre os 700 e 800 nm em águas continentais (MARTINEZ *et al.*, submetido).

Partindo desse pressuposto, as análises das estimativas de reflectância foram centradas na banda 2 do MODIS, referente ao comprimento de onda do infravermelho. A Figura 6 mostra médias de reflectância do infravermelho (NIR) obtidas para cada região analisada no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias.

Os gráficos obtidos através das análises da reflectância permite observar: 1) Um ciclo sazonal bem definido (altos valores espectrais nos meses de chuva e baixos valores nos meses de seca); 2) Uma forte variação da reflectância ao longo do braço do reservatório no sentido da montante à jusante, com valores de reflectância que chegam a 2000 (máscara 1) e valores

baixos de 100 e 50 (máscara 7 e 8); 3) Os altos valores de reflectância nos anos de 2000 a 2004 das primeiras máscaras analisadas. Essa variação pode estar relacionada com o nível da água no reservatório que, em meses de seca, operava com apenas 10% da sua capacidade normal (ONS, 2012).

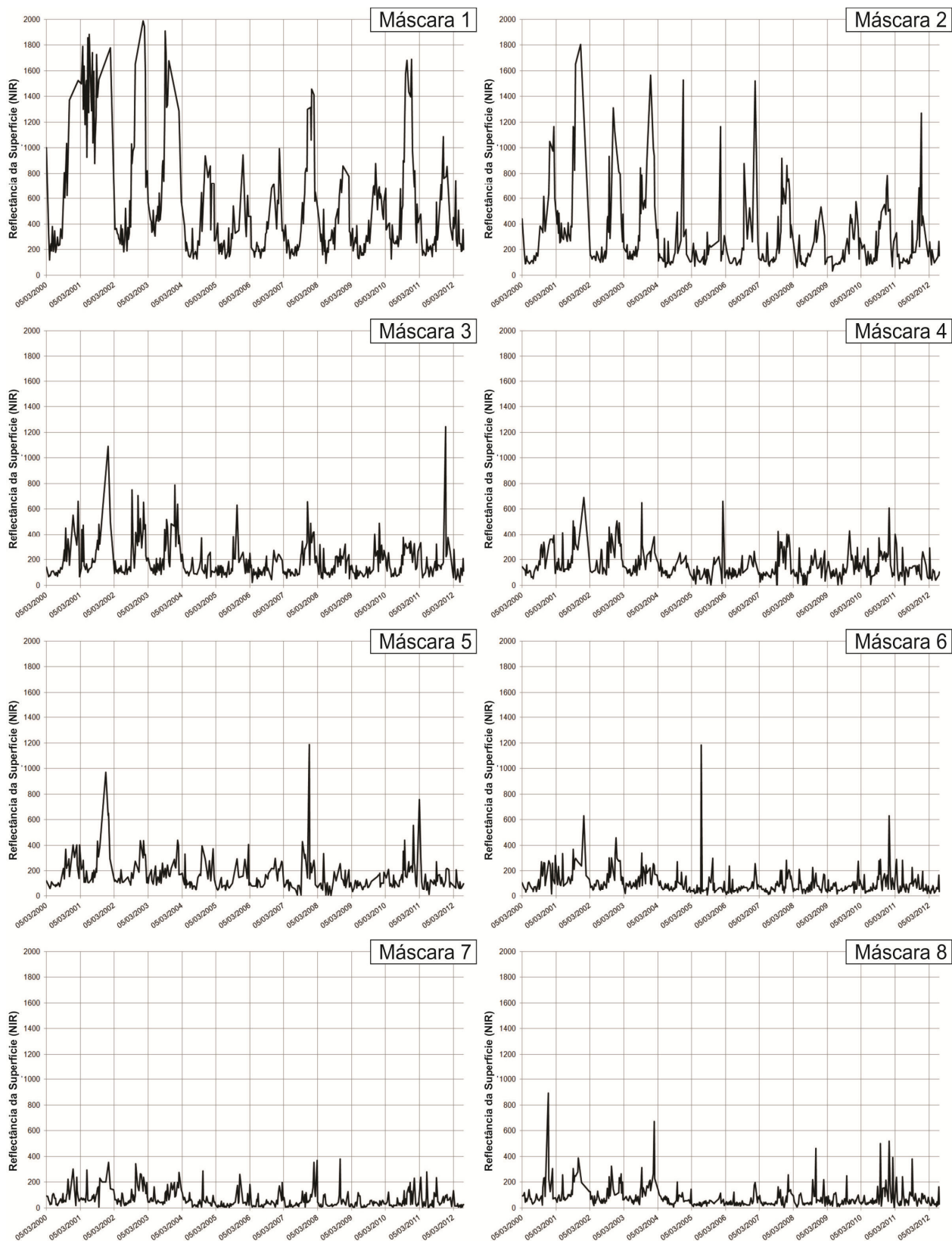


Figura 6. Estimativas de reflectância da superfície da água nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

A resposta do comportamento temporal da reflectância ao longo do braço do rio Indaiá possibilita entender alguns processos do comportamento da entrada do fluxo de sedimento. A Figura 7 apresenta médias mensais para cada máscara analisada. As médias possibilitaram observar que: 1) Existem fortes valores de reflectância nos meses de chuva, principalmente nas 3 primeiras máscaras; 2) Ao longo da série temporal, as máscaras 1 e 2 obtiveram valores acima das outras regiões (descarga contínua de sedimentos).

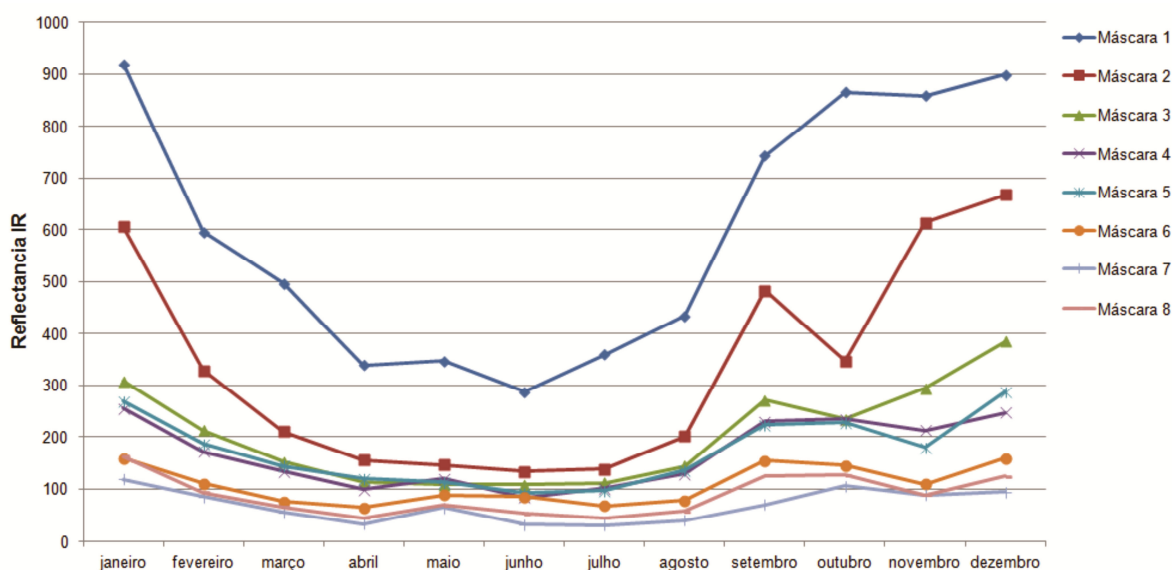


Figura 7. Médias mensais de reflectância da superfície das máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

6.4. Análise espaço-temporal da deposição dos sedimentos no reservatório

Os processos de sedimentação podem ser complexos. Os sedimentos transportados pelo rio são primeiramente depositados devido à redução da velocidade da água no reservatório. O curso de água ao entrar no braço do reservatório tem as seções transversais aumentadas, enquanto as velocidades da corrente decrescem, criando condição de deposição de sedimentos (CARVALHO, 2000).

Um dos principais interesses do uso do sensoriamento remoto em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água (JENSEN, 2009).

As estimativas de reflectância foram calculadas para cada mês do ano, permitindo um estudo espaço-temporal do processo de fluxo de sedimentos ao longo de 12 anos. A Figura 8 mostra médias de reflectância para cada mês do ano em função da distância das 8 máscaras

analisadas. Observou-se o seguinte: 1) Os valores de reflectância diminuem em função da distância das regiões analisadas no sentido montante-jusante; 2) Valores altos de reflectância nos meses de chuvas, principalmente nos primeiros 5 km; 3) Na máscara 5 ocorreu um aumento nos valores médios da reflectância. No braço do reservatório existem pequenos afluentes que podem influenciar diretamente na entrada de sedimentos, alterando a cor da água em diferentes pontos.

A partir dos valores médios de reflectância é possível entender as condições de deposição do sedimentos ao longo do braço do Indaiá. Carvalho *et al* (2000) afirma que os sedimentos carregados pelo rio para dentro do reservatório são distribuídos uniformemente, as partículas maiores como pedregulhos e areias grossas são as primeiras a se depositar, enquanto os sedimentos mais finos adentram ao reservatório. As estimativas de reflectância são fortemente relacionadas com a dinâmica de deposição de sedimentos ao longo do tempo, os dados de satélites são bons indicadores dos processos de carregamento e deposição de sedimentos em reservatórios.

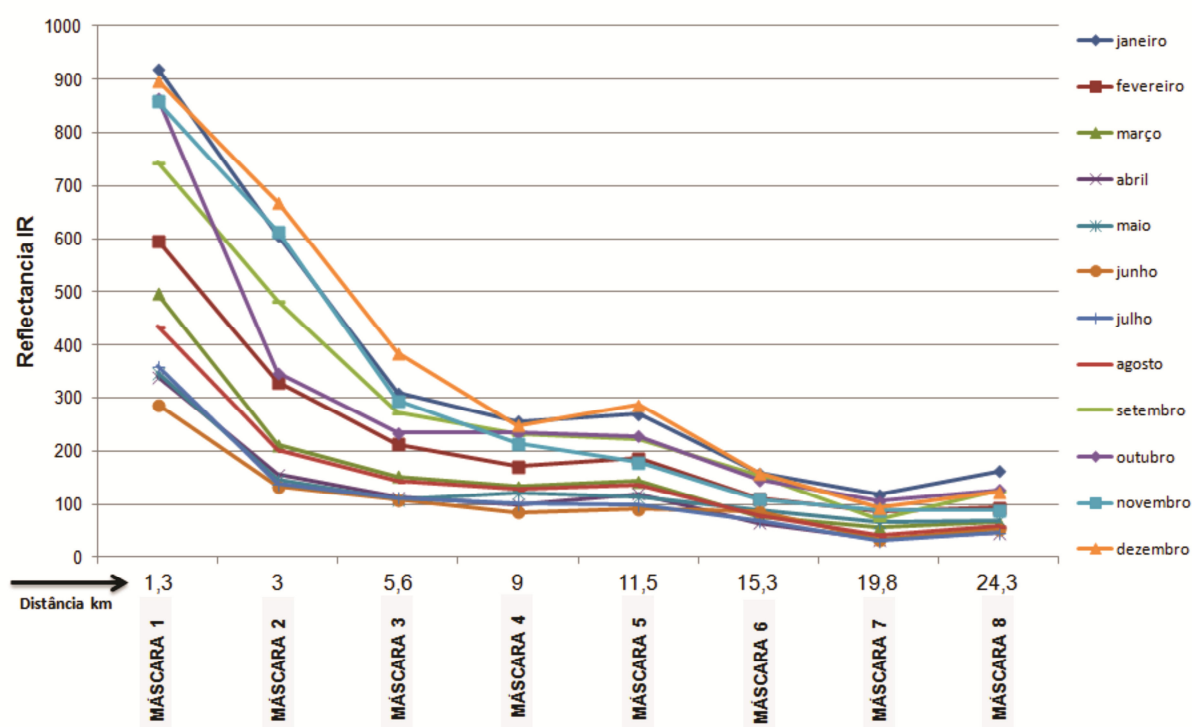


Figura 8. Dados médios mensais de reflectância em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

7. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi investigar o uso de dados MODIS de reflectância da superfície para identificar a variação da entrada dos fluxos de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias em um período de 12 anos. Assim, pôde-se concluir que:

- Os dados de reflectância da superfície podem estar fortemente relacionados com os dados de concentração de sedimentos em todos os ciclos hidrológicos da região;
- O algoritmo MOD3R mostrou-se eficiente em estimar valores de reflectância no braço do reservatório, mas teve dificuldades em estimar pixels puros em algumas regiões, devido a largura do braço e a variação do nível do reservatório;
- O percentual de registros válidos estimados nas imagens MODIS atendem aos requisitos de monitoramento do fluxo de sedimentos. O número de observações obtidas pelos satélites pode auxiliar no monitoramento de todo o ciclo hidrossedimentológico da região;
- Os dados de reflectância das imagens MODIS podem ser usados como solução alternativa para monitorar alguns parâmetros de qualidade de água, como a concentração de sedimentos em braços de reservatórios.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C.C.; MARQUES, J.A.V.; NETO, A.R.S.; Dourado, J.C.; Machado, R.N.S.. Estudo da produção de sedimentos da sub-bacia do ribeirão Taquaruçu Grande (TO). *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba, PR. n 105. ABRH. 2003.

BARBOSA, C.C.F. *Sensoriamento Remoto na dinâmica de circulação da água do sistema de planície de curaiá/Rio Amazonas*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tese (Doutorado) INPE-14614-TDI/1193, São José dos Campos - SP, 282 p. 2007.

BRAGA, C.C.; ROCHA, I. R.; CABRAL, J.B.P.; BARCELOS, A.A. Análise de descarga sólida em suspensão dos afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros-GO. *Revista Geonorte*, Manaus-AM. Edição Especial. v. 3, n. 4, p. 495-505. 2012.

CARVALHO, N.O. *Hidrossedimentometria Prática*. Ed. CPRM.1994. 372p.

CARVALHO, N.O. *Produção de Sedimentos em Função da Variabilidade Climática: O Estudo de Caso da Área Contribuinte ao Reservatório de Três Marias, Região do Alto São Francisco*. Projeto BRA/00/029, ANEEL, PNUD, CT Brasil, Brasília, DF, 2001. 51p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Ed. ANEEL. 2000. 140p.

CHEPAR. *Projeto HL-95 – Avaliação do processo de sedimentação do reservatório*. Ed. Itaipu. Relatório técnico. 1999. 78 p. (Anexos 1 a 5).

DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.M., LAVENDER, S., CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, p. 149-161. 2002.

GEMS. *Improving Global Water quality monitoring - Technical Advisory Paper No. 1.*, United Nation Environment Program - Global Environment Monitoring System. 2003

HOOVER, R.P., 1997. *Sediment sampling in the national stream quality accounting network*. In: U.S. Geological Survey (USGS) Sediment Workshop, February 4-7, 1997. Atlanta, GA. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/osw/techniques/workshop/hooper.html>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais*. São José dos Campos-SP: ed 1. Parênteses, 2009.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F., MASUOKA, E., WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n.1-2, Nov. p 3 –15, 2002a.

JUSTICE, C.O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2 :p. 244-26, 2002b.

KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (Org) *Oceanografia por Satélites*. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 12, p.180-196. 2005.

MACÊDO. I.L. *Estudos de modelos em ambiente de geoprocessamento para previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: O caso da bacia do rio Indaiá - UHE Três Marias, MG*. 2009. 340 f. Tese (Doutorado) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.

MARTINEZ, J.M., GUYOT, J.L., COCHONNEAU, G., ESPINOZA, R., FILIZOLA, N., SEYLER, F., Submetido. *Surface water quality monitoring of rivers with MODIS data - Application to the Amazon River*: Remote Sensing of Environment.

MARTINEZ, J.M., GUYOT, J.L., FILIZOLA, N., SONDAG, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena* 79, 257-264. 2009.

MERTES, L.A.K., SMITH, C.T., E ADAMS, J.B. *Estimating Suspended Sediment Concentrations in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images: Remote Sens. Environ.*, v. 43, p. 281-301, 1993.

MORRIS, G. L. & FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill. NY. 1997. 627p.

NOBREGA, I. W. *Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos*. Tese (Doutorado), INPE-13059-TDI/1023, São José dos Campos - SP, 84 p, 2002.

NOVO, E.M.L.M. *Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2007. p.46.

NOVO, E.M.L.M.; HAMSOM, J.D.; CURRAN, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentrations: *International journal of remote sensing*, v. 10, p. 1283-1289, 1989.

OLIVEIRA, M.R. *Investigação da Contaminação por Metais Pesados da Água e do Sedimento de Corrente nas margens do Rio São Francisco e tributários, a jusante da Represa da Cemig, no município de Três Marias, Minas Gerais*. Tese (Doutorado) . Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte - BH, 2007. 172p.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Volume útil dos principais reservatórios*. 2012. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx>. Acesso em: 10 de nov, 2012.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. *Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil*. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. 425 p.

RUDORFF, C. M. *Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.*: Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais. Dissertação (Mestrado) INPE-14166-TDI/1083, São José dos Campos – SP. 166 p. 2006.

SHEN, H.W. & JULIEN, P.Y. *Erosion and sediment transport. In Maidment, D. R. handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, INC. NY. 1992. p. 12-1, 12-61.

SIVIERO, M.R.L.; COIADO, E.M. Produção de sedimentos a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte, MG. ABRH. 1999.

VALÉRIO, A.M. *O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório do Manso, MT, Brasil*. Dissertação (Mestrado). INPE-16234-TDI/1551, São José dos Campos - SP, 2009. 119p.